تحلیل تأثیر تغییر موقعیت دیواره گرم و افزایش تعداد دیواره سرد و غیرصاف بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال دو بعدی در حضور میدان مغناطیسی

محمد نعمتی[۱و*] و محمد سفید[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد
[۲] استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

دریافت: تابستان ۹۹ پذیرش: تابستان ۹۹

چکیده

در کار حاضر، انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال دوبعدی با شکل و تعداد دیواره‌های غیرصاف مختلف در حضور میدان مغناطیسی در شرایطی که موقعیت دیواره گرم از ورودی کانال متغیر است، شبیه‌سازی شده است. دیواره‌های غیرصاف کانال که در دمای ثابت سرد قرار دارند، در دو شکل منحنی و مورب بررسی شده است. نیمی از طول پایینی کانال با موقعیت متغیر در دمای ثابت گرم و سایر دیواره ها آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت از پایین به بالا بر کانال اعمال می‌شود. تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز، عدد هارتمن، شکل و تعداد دیواره غیر صاف و موقعیت قرار گیری دیواره گرم در این مطالعه ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد در تمامی حالات، افزایش تعداد دیواره‌های غیرصاف و قدرت میدان مغناطیسی منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. همچنین با افزایش فاصله دیواره گرم از ورودی کانال، از میزان انتقال حرارت کاسته می‌شود. بعلاوه هراندازه دیواره گرم از ورودی کانال دورتر باشد، اثر میدان مغناطیسی بر افزایش میزان انتقال حرارت بیشتر خواهد بود.

* **عهده‌دار مکاتبات:** mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

کلمات کلیدی: جابجایی اجباری، تغییر محل قرارگیری دیواره گرم، تغییر هندسه کانال، میدان مغناطیسی.

۱- مقدمه

با توجه به استفاده فراوان از مبدل‌های حرارتی در زمینه‌های مهندسی، افزایش میزان انتقال حرارت در آن‌ها همواره مساله مهمی بوده است و محققان به دنبال راه‌هایی برای این افزایش بوده‌اند. در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی برای توسعه و بهبود مبدل‌های حرارتی صورت گرفته است. برخی از اهداف عمده در این مطالعات را می‌توان صرفه جویی در هزینه و مصرف انرژی و کوچک و سبک کردن آن‌ها برشمرد [۴-۱]. میدان مغناطیسی هم بر جابجایی اجباری و هم بر جابجایی طبیعی اثرگذار است. استفاده از میدان مغناطیسی در جابجایی طبیعی به دلیل کاستن از سرعت در نزدیکی دیواره‌ها منجر به کاهش انتقال حرارت می‌شود. بر خلاف جابجایی طبیعی، در جابجایی اجباری، اعمال نمودن میدان مغناطیسی سبب تخت شدن پروفیل سرعت می‌شود که این امر منجر به افزایش سرعت در نزدیکی دیواره‌های کانال شده و باعث می‌شود که ضریب انتقال حرارت افزایش یابد. میدان مغناطیسی باعث جهت‌گیری منظم ذرات نانوسیال می‌گردد و این موجب ارتباط بیشتر بین ذرات نانو می‌شود. بنابراین در جریان نانوسیال، اعمال میدان مغناطیسی مطلوب، می‌تواند انتقال حرارت را به طور چشمگیری افزایش دهد [۸-۵]. از جمله کاربردهای میدان مغناطیسی می‌توان به استفاده در صنایع ریخته‌گری، پلیمر، متالورژی و صنایع حرارتی اشاره نمود [۹]. تاکنون روش‌های زیادی برای افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پیشنهاد شده است که به دو دسته روش‌های فعال (با صرف انرژی) و غیرفعال (بدون صرف انرژی) تقسیم می‌شوند. در روش‌های فعال یک عامل خارجی مانند میدان مغناطیسی یا نوسان‌ساز سبب ایجاد تغییر در میدان جریان و افزایش نرخ جابجایی می‌شود. در روش‌های غیرفعال، بدون استفاده از منبع خارجی و فقط با اقداماتی مانند تغییر در هندسه مجرای جریان نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهند[۱۰]. کانال با صفحات غیر مسطح به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت، مورد استفاده قرار می‌گیرند.کانال با دیواره منحنی از جمله کانال‌هایی هستند که علاوه بر افزایش نرخ انتقال حرارت، تأثیر کمتری بر گرادیان فشار نامطلوب در طول کانال دارند و بیشتر در جریان‌هایی با اعداد رینولدز پایین استفاده می‌شوند [۱۱]. به چند نمونه از تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته است اشاره می‌شود. نوری و همکاران [۱۲] اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در یک کانال سینوسی شکل را بررسی کردند. نتیجه مطالعه مانکا و همکاران [۱۳] نشان داد تغییر موقعیت محل قرار گیری دیواره گرم نقش بسیار مهمی بر میزان انتقال حرارت از کانال دارد. احمد و همکاران [۱۴] جریان نانوسیال را در یک کانال موجدار مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش عددی و تغییر عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذرات به بررسی اثر این پارامترها بر میزان انتقال حرارت

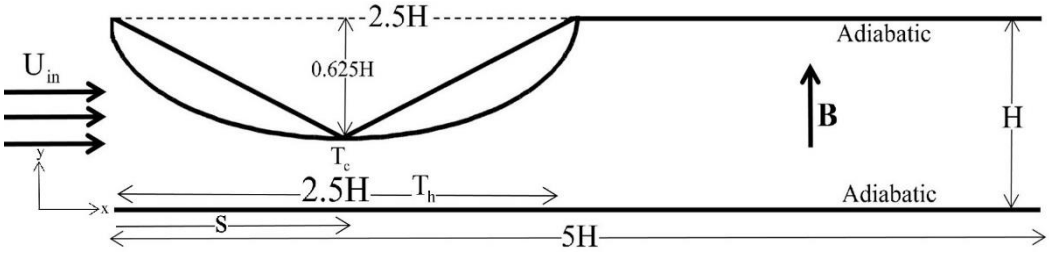
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]

پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش تمامی پارامترها منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود. امین‌الساداتی و همکاران [۱۵] نشان دادند که میزان انتقال حرارت از کانال با گرمایش مقطعی، با افزایش عدد هارتمن و عدد رینولدز بیشتر می‌شود. همچنین برای تمامی مقادیر اعدد رینولدز و هارتمن، افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب بیشتر شدن عدد ناسلت می‌شود. ثروتی و همکاران [۱۶] نشان دادند افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب افزایش سرعت متوسط و دما در خروجی کانال می‌شود. همچنین عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هارتمن به تدریج زیاد می‌شود. عاشوری‌نژاد و ضرغامی [۱۷] تأثیر افزودن نانوذره مس به آب را بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال سینوسی شکل تحت تأثیر میدان مغناطیسی در محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد افزایش کسر حجمی ماده جامد و افزایش قدرت میدان مغناطیسی، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. نتیجه مطالعه یانگ و همکاران [۱۸] برای بهینه سازی انتقال حرارت از کانال موجی شکل حاوی نانوسیال، نشان داد که افزایش میزان انتقال حرارت ، وابسته به عدد رینولدز، دامنه نوسان و کسر حجمی ماده جامد است. حیدری و کرمانی [۱۹] با مطالعه عددی نشان دادند که افزایش کسر حجمی ماده جامد و استفاده از دیواره‌های موجی شکل، میزان انتقال حرارت را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. محبی و همکاران [۲۰] انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال درون کانالی را بررسی کردند که در دیواره‌های پایینی و بالایی آن موانعی مربعی شکل با سطح متغیر تعبیه شده بود. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزایش کسر حجمی ماده جامد منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود که درصد این افزایش در رینولدزهای بالاتر، بیشتر است. بعلاوه مشاهده شد که وجود سطوح گسترش یافته(موانع) موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد. از جمله پژوهش‌های دیگری که در این زمینه صورت گرفته است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. گوهرخواه و همکاران [۲۱] به مطالعه و بهنه‌سازی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تحت اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت پرداختند. درمحمدی و فرزانه [۲۲] انتقال حرارت و تولید آنتروپی نانوسیال درون کانال سینوسی شکل را بررسی کردند. روغنی و همکاران [۲۳] به بررسی عددی جریان عبوری سیال از روی مانع مربعی شکل پرداختند. پروین و حسین [۲۴] اثر میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی سیال درون کانال موجی شکل مثلثی را به روش المان محدود مورد ارزیابی قرار دادند. شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت به روش شبکه بولتزمن از روی موانع مثلثی توسط ویجایبابو و همکاران [۲۵] صورت گرفت. محمدی‌پیروز و همکاران [۲۶] به روش شبکه بولتزمن به بررسی انتقال حرارت درون کانال با موانعی در دیواره‌ها پرداختند. با بررسی کارهای انجام شده، مشاهده می‌شود که تاکنون مطالعات چندانی در رابطه با کانال با دیواره‌های غیرصاف و اثر محل قرارگیری دیواره گرم تحت اثر میدان مغناطیسی صورت نگرفته است. در این مقاله سعی شده است که تأثیر تمامی پارامترهای مهم در انتقال حرارت کانال مورد بررسی قرار گیرد.

۲- هندسه، معادلات حاکم و شرایط مرزی

با توجه به شکل ۱ که هندسه مسأله مورد بررسی را نشان می‌دهد، کانالی دوبعدی با نسبت طول به ارتفاع ۵ برای بررسی در نظر گرفته شده است. سیال با سرعت ورودی و دمای سرد وارد کانال شده و میدان مغناطیسی یکنواخت بصورت عمودی از پایین به بالا اعمال می‌شود. دیواره‌های غیرصاف (در دمای ثابت سرد) و دیواره گرم به طول ۲/۵ برابر عرض کانال است. سایر دیواره‌ها آدیاباتیک هستند. دیواره‌های غیرصاف در دو حالت مورب و منحنی برای تعداد ۱، ۲ و ۴ بررسی شده‌اند. فاصله مرکز دیواره گرم نسبت به ورودی کانال با s سنجیده می‌شود که به صورت $S=s/H$ تعریف می‌شود و سه مقدار ۱/۲۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ را اختیار می‌کند. در کار حاضر عدد پرانتل برابر ۰/۷۱، عدد هارتمن ۰، ۵ و ۱۵ و عدد رینولدز ۸، ۲۴ و ۴۸ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که لزجت سینماتیکی بر اساس عدد رینولدز به صورت $\upsilon = U_{in}.H/Re$ تعریف می‌شود. جریان مورد بررسی آرام، بدون واکنش شیمیایی، دو بعدی، پایا و تراکم ناپذیر بوده و از تقریب بوزینسک استفاده شده است.

معادلات (۱) تا (۴) به ترتیب بقای جرم، مومنتوم در جهت x و y و انرژی را نشان می‌دهد [۱۳]. اگر $\vec{U}$ بردار کلی سرعت باشد که مولفه افقی آن u و مولفه عمودی v باشد، آن‌گاه می‌توان معادلات (۱) تا (۴) را به فرم بسته و به صورت رابطه (۵) و (۶) نوشت.



شکل ۱- هندسه مسأله مورد بررسی

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\rho(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2})-\sigma u B^2 \qquad (۲)$$

$$\rho(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \qquad (۳)$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) \qquad (۴)$$

$$\rho(\vec{U}.\nabla)\vec{U}=-\nabla p+\mu\Delta\vec{U}+\vec{j}\times\vec{B} \qquad (۵)$$

$$(\vec{U}.\nabla)T=\alpha\Delta T \qquad (۶)$$

در معادله (۶)، $\vec{j}$ چگالی جریان الکتریکی است و از قانون اهم محاسبه می‌گردد که در رابطه (۷) ارائه شده است.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]

$$\vec{j}=\sigma(\vec{E}+\vec{U}\times\vec{B}) \qquad (۷)$$

در این رابطه $\vec{E}$ میدان الکتریکی اعمالی، $\vec{B}$ میدان مغناطیسی اعمال شده و $\vec{U}$ میدان سرعت است. میدان مغناطیسی اعمالی یکنواخت بوده به همین دلیل از اثرات ایجاد میدان الکتریکی بخاطر تغییر در میدان مغناطیسی صرفنظر می‌شود. چون هیچ میدان الکتریکی خارجی اعمال نمی‌شود، $\vec{E}$ در معادله (۷) صفر است.

متغیرهای بی بعدی که در این مسأله و ارائه نتایج از آن استفاده می‌شود، در رابطه (۸) بیان شده است.

$$X=\frac{x}{H},\ Y=\frac{y}{H},\ U=\frac{u}{U_{in}},\ V=\frac{v}{U_{in}},$$
$$\theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c},\ P=\frac{p}{\rho U_{in}^2},\ Re=\frac{U_{in}H}{\upsilon},\ Pr=\frac{\upsilon}{\alpha}, \qquad (۸)$$
$$Ha=BH\sqrt{\frac{\sigma}{\mu}},\ Nu=\frac{1}{2.5H}\int_0^1-(\frac{\partial\theta}{\partial Y})_{Y=0}dX$$

شرایط مرزی بی‌بعد برای حل مسأله به صورت روابط (۹) تا (۱۳) می‌باشد.

$$\theta=0,\ U=U_{in},\ V=0 \qquad (۹)$$
$$\frac{\partial\theta}{\partial X}=0,\ \frac{\partial U}{\partial X}=0 \qquad (۱۰)$$
$$\theta=1,\ U=V=0 \qquad (۱۱)$$
$$\frac{\partial\theta}{\partial Y}=0,\ U=V=0 \qquad (۱۲)$$
$$\frac{\partial\theta}{\partial n}=0,\ U=V=0 \qquad (۱۳)$$

۳- نتایج

معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به صورت عددی حل می‌شوند. معادلات تا زمانی حل می‌شوند که که باقی مانده تمامی متغیرها کمتر از 10^{-6} شود.

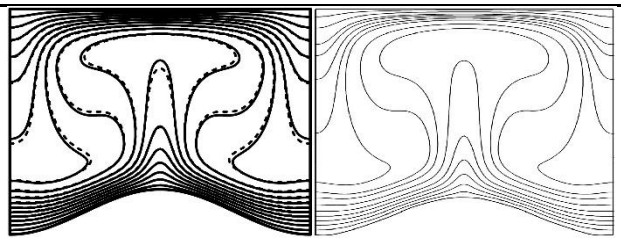
برای کار حاضر، همانطور که در جدول ۱ ارائه شده است، پس از بررسی استقلال حل از شبکه برای Ha=5، دیواره دوتایی مورب، عدد رینولدز ۴۸و S=2.5، شبکه ۸۰×۴۰۰ برای حل انتخاب شد.

به منظور اعتبارسنجی، کار حاضر در مواجهه با میدان مغناطیسی با مرجع [۲۷] در جدول ۲ و راستی آزمایی کد نوشته شده به زبان فرترن روی مرزهای منحنی با مرجع [۲۸] در شکل ۲ مقایسه شده است. همانطور که دیده می‌شود تطابق خوبی بین کار حاضر و نتایج مراجع وجود دارد.

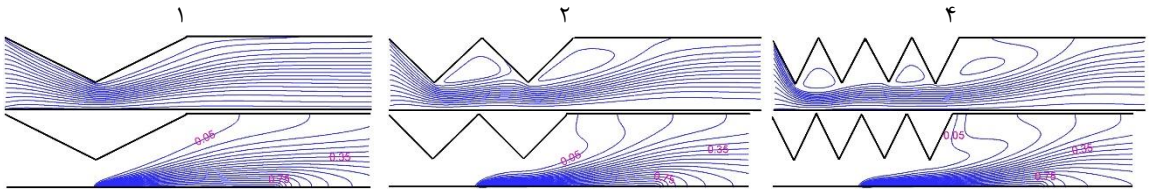
شکل ۳ خطوط جریان و همدما را در حالتی که S= 2.5 و Ha=5 است، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد دیواره سبب ایجاد جریان برگشتی بیشتر و به تبع آن تشکیل گردابه‌های کوچک در اطراف دیواره‌ها می‌شود. زیرا در این حالت تعداد موانع قرار گرفته در برابر جریان افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به خطوط همدما، افزایش تعداد دیواره سبب افزایش انحنای خطوط همدما و متراکم شدن بیشتر خطوط در نزدیکی دیواره گرم می‌شود که این عامل سبب بیشتر شدن گرادیان دمایی و در نتیجه افزایش بیشتر انتقال حرارت می‌شود.

جدول ۱- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۲۷] برای عدد رایلی 10^5

	کار حاضر	مرجع [۲۷]	درصد اختلاف
Ha=0	۱۲/۱۱۲	۱۲/۲۳۳	۰/۹۹۹
Ha=50	۱۲/۴۹۲	۱۲/۷۵۲	۲/۰۸۱
Ha=100	۱۲/۷۷۲	۱۳/۱۶۷	۳/۰۹۳



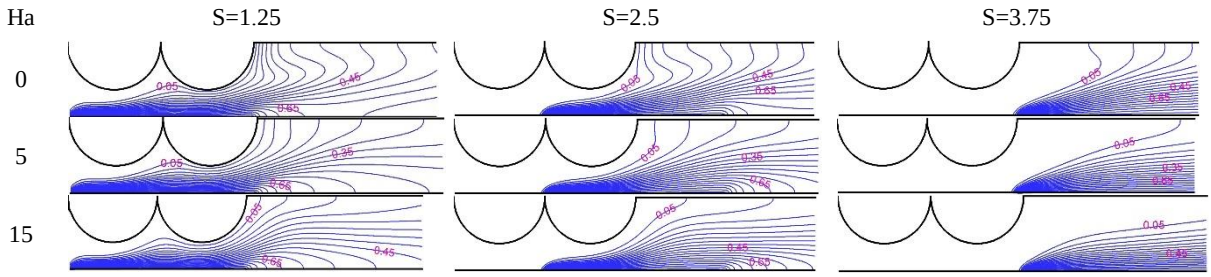
شکل ۲- مقایسه خطوط همدما بین کار حاضر و مرجع [۲۸] در عدد رایلی ۱۰۵



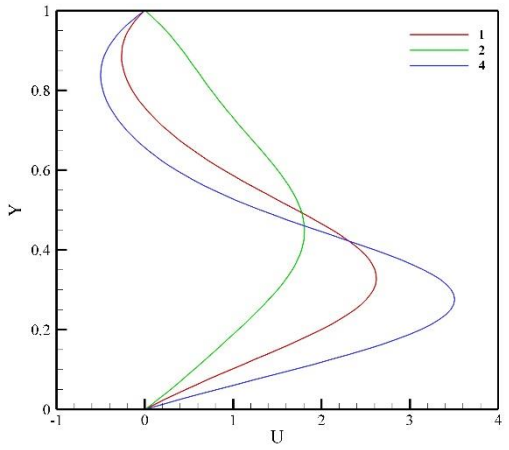
شکل ۳- خطوط جریان (ردیف اول) و همدما (ردیف دوم) به ازای تعداد مختلف دیواره مورب برای عدد رینولدز ۴۸ در Ha=5 و S=2.5

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]

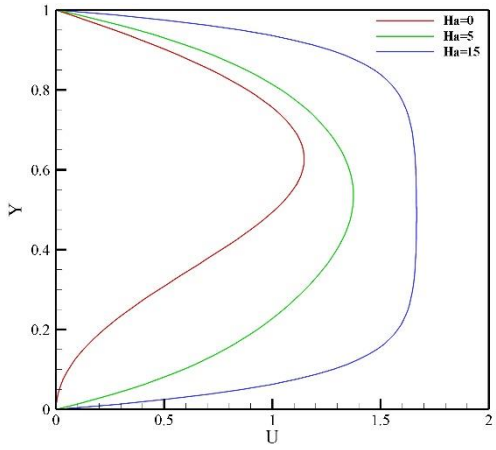
شکل ۴ خطوط همدما را برای مقادیر مختلف S و عدد هارتمن برای دیواره دوتایی منحنی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش عدد هارتمن سبب کم شدن انحنای خطوط م-شود به نحوی که خطوط همدما بیشتر به موازات دیواره گرم قرار می‌گیرند و منجر به تراکم در نزدیکی دیواره گرم می‌شود. این اثر در حالتی که دیواره نزدیک به خروجی کانال است بیشتر است. شکل ۵ سرعت افقی به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن برای دیواره مورب واحد را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب تخت شدن پروفیل سرعت شده که سرعت در نزدیکی دیوار را افزایش می-دهد که همین عامل سبب افزایش میزان انتقال حرارت از دیوار به سیال می‌شود.



شکل ۴- خطوط همدما به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S برای دیواره دوتایی منحنی و عدد رینولدز ۴۸



شکل ۶- سرعت افقی در X=3 برای Re=48، S=2.5 و Ha=5 به ازای تعداد مختلف دیواره منحنی

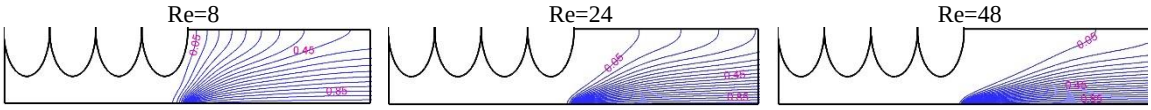


شکل ۵- سرعت افقی در X=3 برای Re=48 و دیواره مورب واحد و S=2.5 به ازای تغییرات عدد هارتمن

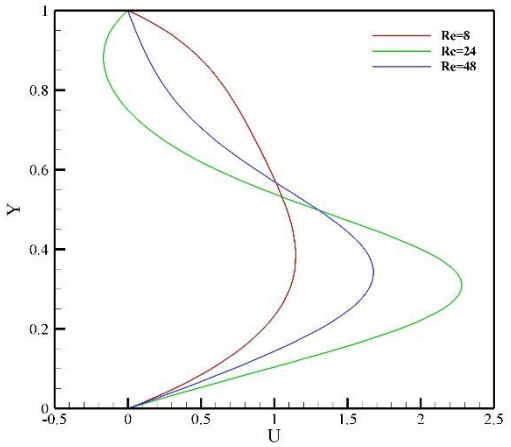
سرعت افقی به ازای تعداد مختلف دیواره در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش تعداد دیواره غیرصاف به دلیل اینکه به نوعی موانع بیشتری را در سر راه جریان قرار می-دهد، سبب می‌شود که جریان برگشتی افزایش یابد. این افزایش تعداد دیواره غیرصاف موجب می‌شود زمانی که سیال در حال عبور از کانال است، سطح مقطع کمتری را تجربه کند و چون بر طبق پایستاری جرم باید دبی جریان ثابت بماند، پس سرعت در پایین کانال افزایش و در بالای کانال سرعت منفی و برگشتی خواهیم داشت. شکل ۷ خطوط همدما را برای ۳ مقدار عدد رینولدز نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان داخل کانال افزایش می‌یابد و این افزایش سبب می‌شود از پراکندگی خطوط همدما کاسته شده و خطوط در مجاورت دیواره گرم متراکم شوند. این عامل منجر به افزایش گرادیان دمایی شده مقدار انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش سرعت با افزایش عدد رینولدز در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که دید می‌شود در عدد رینولدز ۸ و ۲۴ به دلیل کم بودن سرعت جریان، نیروی لزجی بر نیروی اینرسی غالب است و جریان برگشتی و جدایی جریان وجود ندارد ولی در عدد رینولدز ۴۸ شاهد سرعت منفی خواهیم بود که نشان از جدایی جریان و تشکیل گردابه‌های کوچک دارد. جدول ۲ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و عدد رینولدز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان (افزایش عدد رینولدز) همانطور که اشاره شد، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد ولی اثر عدد هارتمن بستگی به عدد رینولدز دارد به نحوی که افزایش عدد هارتمن در عدد رینولدز ۸ سبب کاهش و با افزایش عدد رینولدز منجر

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]

به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. مثلا افزایش عدد هارتمن از صفر به ۱۵ موجب کاهش ۱/۵ درصدی برای عدد رینولدز ۸ و افزایش ۳۷ درصدی در عدد رینولدز ۴۸ می‌شود. عدد ناسلت متوسط به ازای شکل و تعداد دیواره برای مقادیر مختلف S و عدد هارتمن در Re=48 در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود در تمامی حالات با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد که این تأثیر در حالتی که دیواره گرم به خروجی نزدیک‌تر باشد، بیشتر است. مثلا در جدول ۳-ب در حالت دیواره مورب، افزایش عدد هارتمن از ۰ تا ۱۵ سبب افزایش ۳/۶، ۵/۷ و ۴۳ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای S=1.25، S=2.5 و S=3.75 می‌شود. همچنین با توجه به جداول دیده می‌شود بجز در حالت دیواره غیرصاف واحد، زمانی که دیواره‌ها مورب باشد عدد ناسلت متوسط بیشتر خواهد بود. بعلاوه با ثابت ماندن تمامی پارامترها، نزدیک‌تر شدن دیواره گرم به خروجی سبب کم شدت مقدار انتقال حرارت از دیوار به سیال می‌شود زیرا در این حالت فرصت کافی برای گرم شدن سیال وجود ندارد.



شکل ۷- خطوط همدما به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز برای دیواره چهارتایی منحنی در Ha=5 و S=3.75



شکل ۸- سرعت افقی در X=3 برای دیواره چهارتایی منحنی در Ha=5 و S=3.75 به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز

در کار حاضر اثر افزایش عدد هارتمن و تعداد دیواره‌های غیرصاف در دو شکل مختلف با تغییر موقعیت قرارگیری دیواره گرم کانال بررسی شد. خلاصه نتایج حاصله عبارتند از:

- با ثابت بودن تمامی پارامترها، افزایش عدد هارتمن و تعداد دیواره‌های غیرصاف کانال، عدد ناسلت متوسط را افزایش می‌دهد. اثر میدان مغناطیسی زمانی که دیواره به خروجی نزدیک‌تر باشد، بیشتر است.
- با دور شدن موقعیت دیواره گرم از ورودی کانال، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. زیرا دیواره گرم از دیواره‌های سرد فاصله می‌گیرند. همچنین بجز در حالت دیواره واحد در هر دو شکل دیواره، دیواره مورب سبب بیشتر شدن میزان انتقال حرارت می‌شود.

۴- جمع‌بندی

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف Re در S=3.75 و دیواره منحنی چهارتایی

	Re =8	Re =24	Re =48
Ha=0	۴/۶۱۱	۸/۰۵۱	۸/۴۹۵
Ha=5	۴/۸۵۴	۸/۵۵۱	۸/۹۶۳
Ha=15	۴/۴۹۵	۱۰/۲۱۱	۱۱/۶۷۵

جدول ۳-الف: عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای دیواره واحد

شکل دیواره	Ha=0			Ha=5			Ha=15		
	S=1.25	S=2. 5	S=3.75	S=1.25	S=2. 5	S=3.75	S=1.25	S=2. 5	S=3.75
مورب	۱۵/۰۴۵	۱۱/۸۲۵	۸/۴۱۱	۱۵/۵۲۵	۱۲/۴۱۵	۹/۸۹۱	۱۶/۲۴۵	۱۳/۴۳۱	۱۱/۷۹۵
منحنی	۱۵/۹۹۱	۱۲/۰۸۵	۸/۴۱۵	۱۶/۷۱۱	۱۲/۸۸۵	۹/۹۰۱	۱۷/۸۳۱	۱۴/۲۵۵	۱۱/۸۸۸

جدول ۳-ب: عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای دیواره دوتایی

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]

شکل دیواره	Ha=0			Ha=5			Ha=15		
	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2. 5	S=3.75	S=1.25	S=2. 5	S=3.75
مورب	۱۷/۰۵۱	۱۳/۴۱۲	۸/۶۱۲	۱۷/۶۷۳	۱۴/۱۷۱	۱۰/۴۴۲	۱۸/۲۳۳	۱۵/۰۵۱	۱۲/۳۴۵
منحنی	۱۶/۰۹۲	۱۲/۴۸۵	۸/۲۹۱	۱۶/۹۸۵	۱۳/۵۲۲	۱۰/۰۱۲	۱۸/۰۰۱	۱۴/۶۶۵	۱۱/۶۱۲

جدول ۳-ج: عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای دیواره چهارتایی

شکل دیواره	Ha=0			Ha=5			Ha=15		
	S=1.25	S=2. 5	S=3.75	S=1.25	S=2. 5	S=3.75	S=1.25	S=2. 5	S=3.75
مورب	۱۸/۸۸۹	۱۴/۸۵۳	۹/۱۵۴	۱۹/۵۷۱	۱۵/۶۸۵	۱۰/۹۸۵	۲۲/۱۸۵	۱۸/۹۳۵	۱۴/۸۸۵
منحنی	۱۶/۱۷۶	۱۲/۵۷۸	۸/۴۹۵	۱۷/۱۱۷	۱۳/۸۸۵	۱۰/۲۱۱	۱۸/۲۲۵	۱۵/۰۰۵	۱۱/۶۷۵

۵- فهرست علائم

سرعت بی‌بعد	U,V	قدرت میدان مغناطیسی	B
سرعت ورودی	U_{in}	عرض کانال	H
مختصات بی‌بعد	X,Y	عدد هارتمن	Ha
ضریب پخش حرارتی	α	عدد ناسلت	Nu
لزجت دینامیکی	μ	عدد پرانتل	Pr
دمای بی‌بعد	θ	عدد رینولدز	Re
چگالی	ρ	فاصله بی‌بعد دیواره گرم از ورودی کانال	S
لزجت سینماتیکی	υ	دما	T

۶- مراجع

[1] N. Kurtulmuş, "Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 167, Pp. 105-118, 2020.

[۲] نعمتی محمد، رحمتی احمدرضا، " اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آب درون محفظه مستطیلی شکل با دو دیواره غیر صاف به روش شبکه بولتزمن"، *مجله علمی تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی*، شماره ۵، دوره ۲، صفحه ۵۴-۴۷، ۱۳۹۷.

[۳] نعمتی محمد، محمدزاده هاجر، سفید محمد، "مطالعه عددی اثر افزایش عدد هارتمن، دامنه و تعداد نوسان دیواره موج‌دار بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه دو بعدی متخلخل،" *مجله علمی تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی*، شماره ۷، دوره ۱، صفحه ۲۲-۱۵، ۱۳۹۹.

[۴] رحمتی احمدرضا، نعمتی محمد، (۱۳۹۸). "کاربرد روش شبکه بولتزمن در شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک محفظه متوازی‌الاضلاع شکل در حضور میدان مغناطیسی،" *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک ایران*، شماره ۱۰، دوره ۲، صفحه ۱۱۳-۹۲، ۱۳۹۸.

[5] H. Vaidya, R. Choudhari, M. Gudekote, K. V. Prasad, O. D. Makinde, and K. Vajravel, "Heat and mass transfer analysis of MHD peristaltic flow through a complaint porous channel with variable thermal conductivity," *Physica Scripta*, vol. 55, pp. 311-324, 2020.

[6] M. Aleem, M. I. Asjad, A. Ahmadian, M. Salimi, and M. Ferrara, "Heat transfer analysis of channel flow of MHD Jeffrey fluid subject to generalized boundary conditions," The European Physical Journal Plus, vol. 135, pp. 1-15, 2020.

[7] C. Soto, S. Smolentsev, and C. García-Rosales, "Mitigation of MHD phenomena in DCLL blankets by Flow Channel Inserts based on a SiC-sandwich material concept," *Fusion Engineering and Design*, vol. 151, pp. 111-121, 2020.

[8] S. U. Haq, M. A. Khan, Z. A. Khan, and F. Ali, "MHD Effects on the Channel Flow of a Fractional Viscous Fluid Through a Porous Medium; An Application of the Caputo-Fabrizio Time-Fractional Derivative," *Chinese Journal of Physics*, vol. 55, pp. 247-258, 2020.

[9] K.-A. Yih and C.-J. Huang, "Non-Linear Radiation, Chemical Reaction, and Soret/Dufour Effects on Magnetohydrodynamic Natural

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]

Convection About a Permeable Horizontal Circular Cylinder in Non-Darcy Porous Media With Heat Source/Sink," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 12, pp. 11-23, 2020.
[10] M. Nemati, M. Sefid, A. R. Rahmati, "The effect of changing the position of the hot wall and increasing the amplitude and number of oscillations of wavy wall on the flow and heat transfer of nanofluid inside the channel in the presence of magnetic field," Journal of Solid and Fluid Mechanics, vol. 10, pp. 219-236, 2020.
[11] A. Joodaki, "Numerical Analysis of Fully Developed Flow and Heat Transfer in Channels with Periodically Grooved Parts," *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, vol. 31, pp. 1129-1138, 2018.
[12] R. Nouri, M. Gorji-Bandpy, and D. Domiri Ganji, "Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, pp. 43-55, 2014.
[13] O. Manca, S. Nardini, K. Khanafer, and K. Vafai, "Effect of heated wall position on mixed convection in a channel with an open cavity," *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, vol. 43, pp. 259-282, 2003.
[14] M. Ahmed, N. Shuaib, and M. Z. Yusoff, "Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 5891-5898, 2012.
[15] S. Aminossadati, A. Raisi, and B. Ghasemi, "Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 46, pp. 1373-1382, 2011.
[16] K. Javaherdeh and H. R. Ashorynejad, "Magnetic field effects on force convection flow of a nanofluid in a channel partially filled with porous media using Lattice Boltzmann Method," *Advanced Powder Technology*, vol. 25, pp. 666-675, 2016.
[17] H. R. Ashorynejad and A. Zarghami, "Magnetohydrodynamics flow and heat transfer of Cu-water nanofluid through a partially porous wavy channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 119, pp. 247-258, 2019.
[18] Y.T. Yang, Y.H. Wang, P.K. Tseng, "A micro convection model for thermal conductivity of nanofluids" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 207-228, 2015.
[19] H. Heidary and M. Kermani, "Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1520-1527, 2010.
[20] R. Mohebbi, M. Rashidi, M. Izadi, N. A. C. Sidik, and H. W. Xian, "Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 1291-1303, 2018.
[21] M. Goharkhah, M. Esmaeili, and M. Ashjaee, "Numerical Simulation and Optimization of Forced Convection Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Channel in the Presence of a Non-Uniform Magnetic Field," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 118, pp. 1281-1293, 2019.
[22] R. Dormohammadi, M. Farzaneh-Gord, A. Ebrahimi-Moghadam, and M. H. Ahmadi, "Heat transfer and entropy generation of the nanofluid flow inside sinusoidal wavy channels," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 269, pp. 229-240, 2018.
[23] S. Rowghani, M. Mirzaei, and R. Kamali, "Numerical Simulation of Fluid Flow Past a Square Cylinder Using a Lattice Boltzmann Method," *Journal of Aerospace Science and Technology (JAST)*, vol. 7, pp. 9-17, 2010.
[24] S. Parvin and N. Hossain, "Finite element simulation of MHD combined convection through a triangular wavy channel," *International communications in heat and mass transfer*, vol. 39, pp. 811-817, 2012.
[25] T. Vijaybabu, K. Anirudh, and S. Dhinakaran, "Lattice Boltzmann simulations of flow and heat transfer from a permeable triangular cylinder under the influence of aiding buoyancy," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 799-817, 2018.
[26] M. M. Pirouz, M. Farhadi, K. Sedighi, H. Nemati, and E. Fattahi, "Lattice Boltzmann simulation of conjugate heat transfer in a rectangular channel with wall-mounted obstacles," *Scientia Iranica*, vol. 18, pp. 213-221, 2011.
[27] M. Sathiyamoorthy and A. Chamkha, "Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side wall (s)," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1856-1865, 2010.
[28] A. Shahriari and H. R. Ashorynejad, "Numerical study of heat transfer and entropy generation of Rayleigh–Bénard convection nanofluid in wavy cavity with magnetic field," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 17, pp. 385-396, 2017.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.2.1]